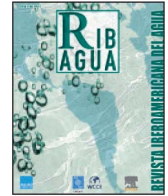




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Original

Optimización del diseño del sistema de llenado/vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá

A.N. Menéndez*, E.A. Lecertua y N.D. Badano

Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 1 de mayo de 2014

Aceptado el 6 de agosto de 2014

Palabras clave:

Canal de Panamá
Diseño hidráulico
Efectos de escala
Esclusas
Modelación física
Modelación numérica

RESUMEN

Se describe y valida el sistema de modelación construido para diseñar el sistema hidráulico de llenado/vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá. El sistema de modelación está constituido por una serie de modelos numéricos de cero, una, dos y tres dimensiones espaciales, y un modelo físico. Se analiza su aplicación para seleccionar y optimizar el diseño de los componentes no estándar del sistema hidráulico, determinar los tiempos de apertura y cierre de válvulas de modo que no se excedan las condiciones de diseño, calcular las tasas medias de pasaje de buques y de consumo de agua dulce, y establecer alternativas para minimizar la vorticidad en las tomas de agua de las tinas de almacenamiento lateral. Se muestra que la modelación numérica ha sido la base fundamental del diseño, y el mecanismo para generar resultados a la escala de prototipo libres de efectos de escala presentes en el modelo físico, mientras que el rol principal de la modelación física ha sido el de validar a la modelación numérica. Pero también se demuestra que el modelo físico puso en evidencia efectos de resonancia que obligaron a redefinir algunas de las estrategias de simulación numérica.

© 2014 IAHR and WCCE. Publicado por ELSEVIER ESPAÑA, S.L. Todos los derechos reservados.

Design optimization of the filling/emptying system for the Third Set of Locks of the Panama Canal

ABSTRACT

The modeling system, which was built to design the filling/emptying hydraulic system of the third set of locks of Panama Canal, is described and validated. The modeling system is constituted by a series of zero, one, two, and three-dimensional numerical models, and a physical model. A discussion is presented on its application to select and optimize the non-standard components of the hydraulic system, determine the open and closure times for the valves in order not to exceed design conditions, calculate the mean rate of vessels throughput and freshwater consumption, and establish alternatives in order to minimize vorticity at the intakes of the lateral water saving basins. It is shown that numerical modeling played the prime role for design, and constituted the mechanism to produce results at the prototype scale free of scale effects present in the physical model, while the main role of the physical model was to validate the numerical models. But it is also shown that the physical model put into evidence resonance effects which led to a redefinition of some of the strategies of numerical simulation.

© 2014 IAHR and WCCE. Published by ELSEVIER ESPAÑA, S.L. All rights reserved.

Keywords:

Hydraulic design
Locks
Numerical modeling
Panama Canal
Physical modeling
Scale effects

1. Introducción

El Canal de Panamá es una vía navegable de aproximadamente 72 km de extensión que conecta los océanos Atlántico y Pacífico. Su construcción se completó en el año 1914, y ha operado de forma continua durante estos 100 años. Constituye el centro geográfico, económico y social de la República de Panamá, y se ha establecido como un facilitador fundamental del comercio internacional, ya que ha reducido

significativamente distancias, costos y tiempos de navegación. Incluye tres sistemas de esclusas: Miraflores y Pedro Miguel del lado del Pacífico (separadas por el lago Miraflores), y Gatún del lado del Atlántico; en medio de ellas se desarrolla el lago Gatún (Fig. 1). Las esclusas están compuestas por dos carriles paralelos y por una o más cámaras.

En 1986 la *World Association for Waterborne Transport Infrastructure* (PIANC) produjo lineamientos de referencia internacionales para el diseño de esclusas [1]. En 2009, estos fueron complementados por un nuevo informe que incluyó actualizaciones [2].

El eje del proyecto de expansión del Canal de Panamá es la construcción de un Tercer Juego de Esclusas que proveerá un tercer carril

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: angel.menendez@speedy.com.ar (A.N. Menéndez).

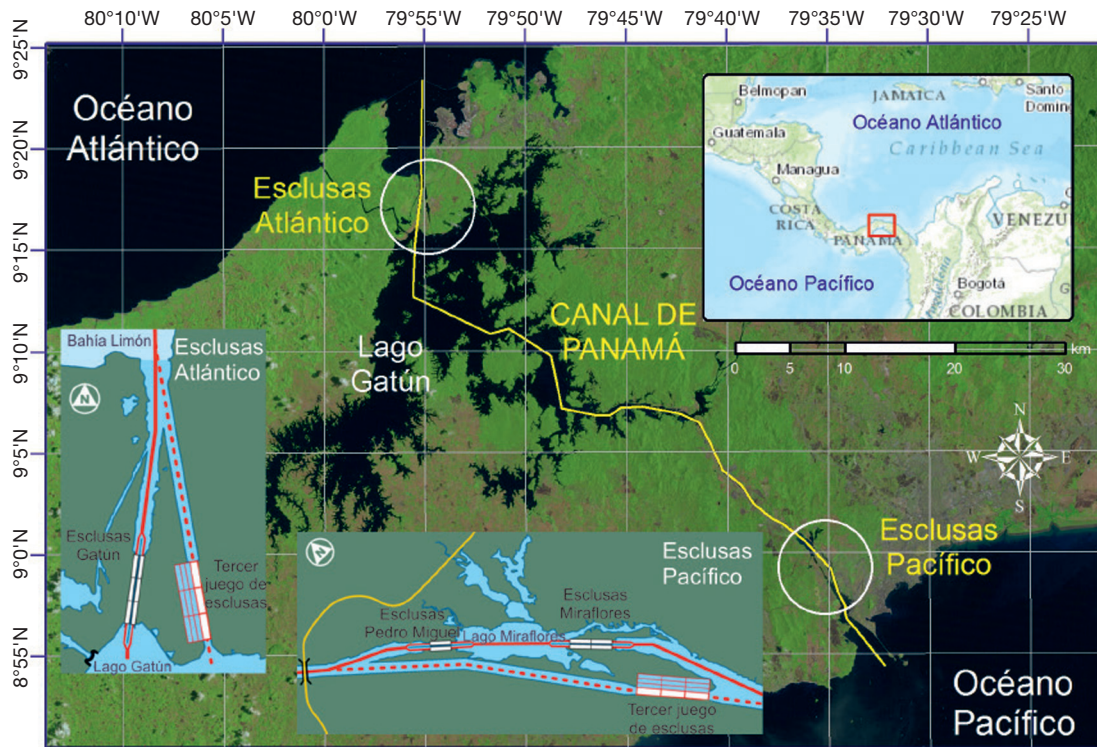


Figura 1. Ubicación y componentes del Canal de Panamá.

de mayores dimensiones en ambos extremos (Atlántico y Pacífico; véase la línea punteada en la Fig. 1), el cual permitirá el tránsito de buques de mayor tamaño (Pos-Panamax, de hasta 366 m de eslora y 49 m de manga), con una capacidad de carga de hasta 2,5 veces la de los actuales buques Panamax. El proyecto incluye tres componentes principales:

- La construcción de dos sistemas de esclusas entre cada océano y el lago Gatún, compuestos por tres cámaras en serie, cada una con

tres tinas laterales de almacenamiento para disminuir la pérdida de agua dulce hacia el océano durante las maniobras de esclusado (Fig. 2).

- La construcción de los canales de acceso a los nuevos sistemas de esclusas, y el ensanchamiento y profundización de los canales de navegación existentes para permitir el tránsito de los nuevos tipos de buque.
- La elevación del máximo nivel de operación del lago Gatún, desde 26,67 a 27,13 m PLD (*precise level datum*, el cero de referencia), para

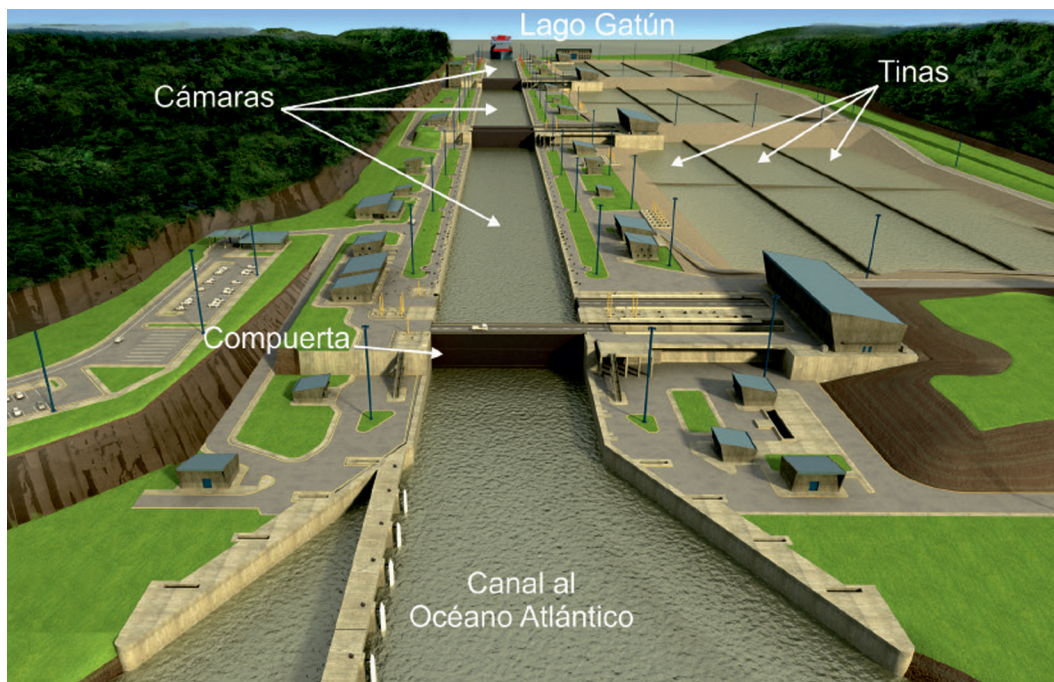


Figura 2. Proyecto de esclusa.

mejorar el suministro de agua y el calado de navegación. Se ofrecen detalles adicionales en Panama Canal Authority [3], Lara *et al.* [4] y Re *et al.* [5].

El sistema hidráulico de llenado/vaciado de las cámaras de las esclusas, que opera completamente a gravedad, constituye un elemento vital del proyecto. El objetivo del presente estudio fue la verificación del diseño planteado por los proyectistas para ese sistema, así como su optimización. La optimización tuvo como principales objetivos: reducir los tiempos hidráulicos de operación (llenado y vaciado de las cámaras); minimizar los volúmenes de agua dulce vertidos al océano durante los escludados, y minimizar las fuerzas sobre las amarras de los buques estacionados en las cámaras (que están asociadas a las oscilaciones de la superficie libre). Al mismo tiempo, se debió cumplir con las siguientes restricciones:

- Velocidades máximas en los conductos (que operan siempre a presión) inferiores a 8 m/s para evitar desgastes excesivos.
- Pendientes longitudinales y laterales máximas de la superficie libre en las cámaras (en ausencia de buque) de 0,14% y 0,10%, respectivamente, como indicadores de la limitación sobre las respectivas componentes de fuerzas sobre las amarras (obviamente, en presencia de buque).

Para estudiar estos problemas se desarrolló un sistema de modelación integrado por diversos modelos numéricos (de distinto alcance) y un modelo físico, que operan de forma interrelacionada entre sí. En un artículo previo, un integrante de la Autoridad del Canal de Panamá, requirente de estos estudios, presentó una descripción general del sistema [6]. En el presente artículo se describen los detalles técnicos del sistema de modelación (en particular, los modelos numéricos) y los principales resultados obtenidos a través de su aplicación.

2. Sistema de llenado/vaciado

En primer lugar, se describe el sistema de llenado/vaciado de las cámaras de las esclusas.

Sus componentes principales son los siguientes (Fig. 3):

- Tres cámaras (superior, media e inferior) en serie (cada una de 426,7 m de largo, 54,9 m de ancho y 18,3 m de profundidad máxima).
- Tres tinas de almacenamiento lateral (alta, intermedia y baja) por cámara (cada una de 426,7 m de largo, 70 m de ancho y 5,5 m de profundidad máxima), donde se almacena agua cuando se opera vaciando la cámara, y desde donde se extrae agua cuando se opera llenándola.
- Dos conductos principales (cada uno de 8,3 m de alto y 6,5 m de ancho) a lo largo de las paredes de las esclusas para transportar agua entre cámaras, lago y océano, que rematan en obras de toma en el lago y obras de descarga en el océano.
- Cuatro conductos secundarios (dos por lado, cada uno de 6,5 m de alto y 6,5 m de ancho), alimentados por los conductos principales (durante el llenado) a través de una conexión central.
- Diez puertos por conducto secundario (cuadrados, de 2 m de lado), que alimentan (durante el llenado) la correspondiente cámara.
- Conductos entre los secundarios y las tinas (que incluyen conexión al secundario, divisor de flujo, trifurcación y obra de toma de tinas).
- Válvulas en los conductos principales y en los de comunicación tina/conducto secundario.

El sistema opera de acuerdo con los siguientes procedimientos. Cuando un buque se traslada desde el océano hacia el lago Gatún, el nivel del agua en cada cámara se incrementa en dos pasos: en primer

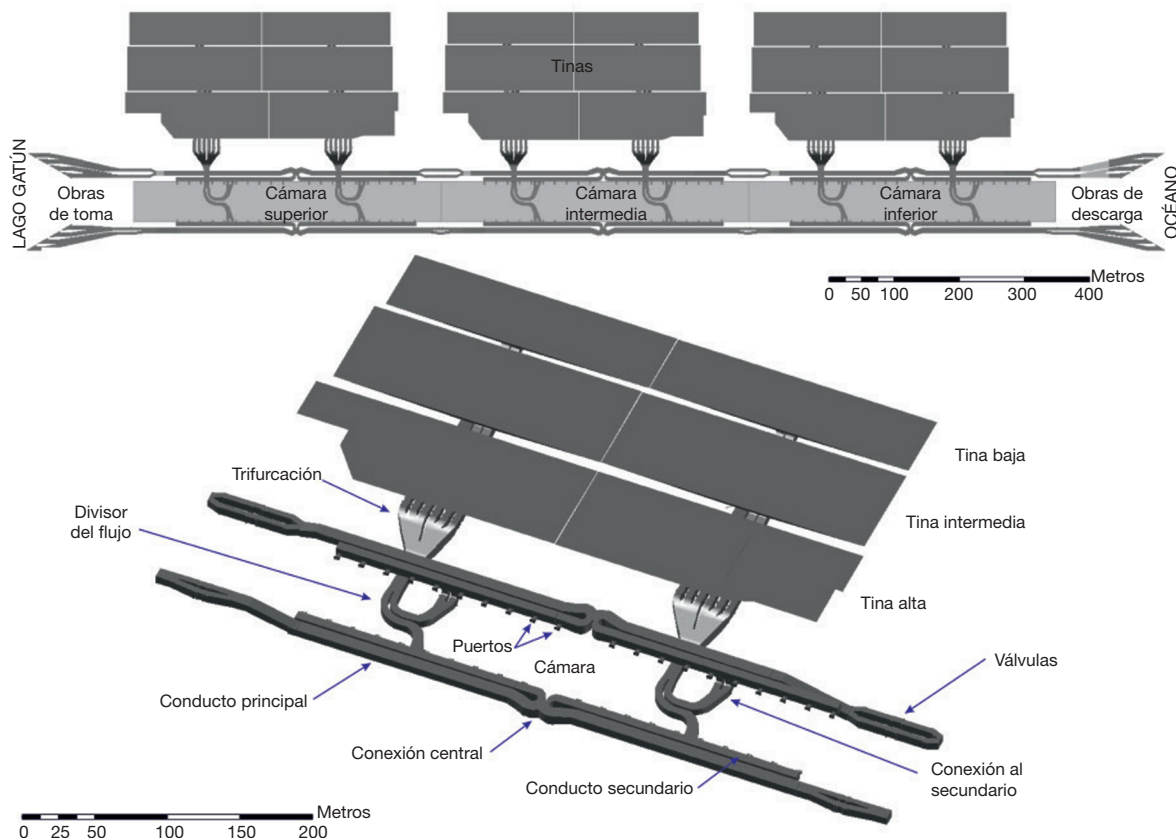


Figura 3. Componentes del sistema de llenado/vaciado. Superior: conjunto completo. Inferior: detalle de una cámara y un sistema de tinas.

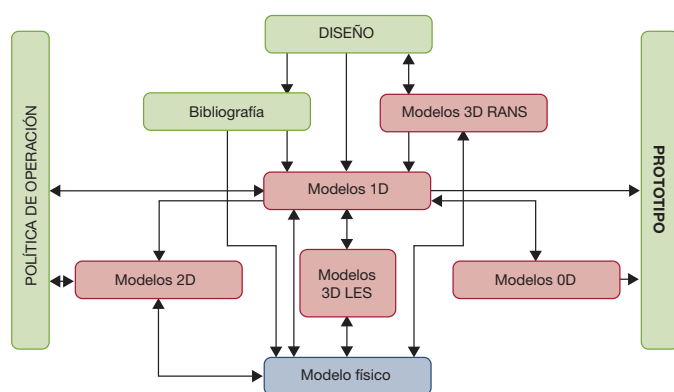


Figura 4. Sistema de modelación.

lugar, recibiendo toda el agua disponible desde las correspondientes tinajas en forma sucesiva, comenzando con la baja; y en segundo lugar, recibiendo agua desde el reservorio superior (cámara o lago) hasta que los dos niveles se igualan. A la inversa, cuando un buque se traslada desde el lago hacia el océano, el nivel del agua en cada cámara se disminuye en dos pasos: primero, enviando toda el agua posible hacia las correspondientes tinajas en forma sucesiva, comenzando con la alta; y segundo, enviando agua hacia el reservorio inferior (cámara u océano) hasta que los dos niveles se igualan.

3. Sistema de modelación

3.1. Descripción general

El esquema del sistema de modelación desarrollado se muestra en la figura 4. El componente central es una serie de modelos hidrodinámicos unidimensionales que simulan el flujo a lo largo de los distintos circuitos del sistema de llenado/vaciado, y cuyo objetivo principal es determinar los tiempos de llenado/vaciado de las cámaras para distintas condiciones operativas, y verificar que no se supera el valor máximo establecido de velocidad de flujo, para lo cual se debe ajustar la política de operación de las válvulas.

Los modelos tridimensionales RANS (véase más adelante) de componentes no estándar del sistema de llenado/vaciado simulan el flujo a través ellos. Su objetivo principal es determinar la pérdida de energía mecánica entre la entrada y la salida, de donde surgen los respectivos coeficientes de pérdida de carga local que emplean los modelos unidimensionales. Estos modelos tridimensionales RANS se utilizaron entonces para optimizar el diseño de esos componentes, a través de un proceso iterativo de prueba y análisis para reducir las pérdidas energéticas el máximo posible, minimizando así los tiempos de llenado/vaciado. En el caso de componentes estándar (o de poco efecto relativo), los coeficientes de pérdida para los modelos unidimensionales se establecieron a partir de datos de la bibliografía [7,8].

También se utilizaron modelos tridimensionales RANS para estudiar soluciones que minimizaran la vorticidad en las obras de toma de las tinajas, con el objetivo de evitar la entrada de aire en el sistema. Además, se empleó una combinación de modelos unidimensionales y modelos tridimensionales RANS de las válvulas como apoyo para cálculos efectuados durante el análisis de la posible aparición de fenómenos de cavitación y aireación en estos componentes.

Los modelos bidimensionales horizontales (integrados en la vertical) de las cámaras simulan las oscilaciones de la superficie libre a consecuencia de las operaciones de llenado y vaciado. Sus longitudes de onda, determinadas por las dimensiones de la cámara (del orden de 500 m de largo y 50 m de ancho), son mucho mayores que la profundidad (alrededor de 15 m), justificando entonces la aproximación hidrostática [9]. Estos modelos son forzados con los hidrogramas en

los puertos provistos por los correspondientes modelos unidimensionales, y proveen las pendientes longitudinales y laterales máximas (indicadores de las fuerzas máximas sobre las amarras). La no verificación de la restricción sobre alguna de ellas indica la necesidad de ajustar la respectiva política de operación y volver a ensayarla con el modelo unidimensional correspondiente.

Con la metodología descrita, los modelos bidimensionales simulan con éxito las oscilaciones de la superficie libre en la mayor parte de los casos, pero fallan en algunos casos extremos de muy alta diferencia de nivel inicial entre las cámaras. Esto no es una limitación de los modelos bidimensionales sino de su forzante, y se debe a la incapacidad del modelo unidimensional de representar oscilaciones turbulentas, originadas en la conexión central, que en esos casos entran en resonancia con las oscilaciones longitudinales en la cámara [10]. Para esas situaciones se recurrió entonces a modelos tridimensionales LES (véase más adelante), capaces de capturar este fenómeno.

Los modelos cerodimensionales de cada uno de los dos sistemas de esclusas simulan, para distintas condiciones de marea del océano y de nivel del lago, el intercambio de agua entre el lago, el océano y el conjunto de tres cámaras y tinajas asociadas, para las operaciones de entrada y salida de buques. Utilizan como dato las relaciones entre la diferencia de nivel y los tiempos de llenado/vaciado provistos por los modelos unidimensionales, y proveen como productos la tasa media de pasaje de buques, el volumen de agua dulce consumido y las estadísticas de diferencia de nivel de agua entre los reservorios. A partir de estas últimas se definen los escenarios de ensayo significativos para los modelos unidimensionales.

El modelo físico se construyó a una escala de 1/30 en la Compagnie Nationale du Rhône (CNR, Lyon, Francia), y representó dos cámaras y un conjunto de tres tinajas laterales. En general, en lo que respecta al diseño de componentes, el modelo físico operó como validador de los resultados obtenidos con los modelos numéricos. Lo contrario se dio al estudiar soluciones para minimizar la vorticidad en las obras de toma de las tinajas, debido a la facilidad para implementarlas en el modelo físico; en este caso, la modelación numérica se utilizó para extra-polar los resultados a la escala del prototipo, ya que los efectos de escala conducen a resultados no conservadores. Además, de los ensayos en el modelo físico surgió la relación entre fuerzas sobre las amarras y pendientes de la superficie libre (en ausencia de buque, para las mismas condiciones) que sirvió para establecer a las segundas como indicadores de las primeras.

Los resultados de desempeño del sistema de llenado/vaciado a escala de prototipo (tiempos hidráulicos de operación, tasa de pasaje de buques, volúmenes de agua vertidos al océano) surgieron de los modelos unidimensionales (que evitan los efectos de escala del modelo físico, tal como se indica más adelante) y cerodimensionales.

A continuación se describe la implementación de cada uno de los modelos numéricos.

3.2. Modelación cerodimensional

La modelación cerodimensional expresa balances de masa (ecuación de continuidad), que se transforman en balances de volumen debido a la hipótesis de incompresibilidad. Los modelos cerodimensionales se construyeron sobre la base del código numérico ESCLUSA, especialmente desarrollado para este proyecto. El algoritmo procede continuamente en el tiempo, con un intervalo de tiempo de 1 segundo, llevando cuenta de los tiempos y volúmenes de agua invertidos en las sucesivas operaciones asociadas al pasaje de un buque (apertura/cierre de compuertas, llenado/vaciado de cámaras y tinajas, desplazamiento del buque entre reservorios, inicialización de niveles de agua), desde que entra en el sistema hasta que lo deja. Considera explícitamente el caso de presencia simultánea de un buque en la cámara superior y otro en la cámara inferior. Tiene en cuenta la inversión de tránsito cada 12 horas, por lo que contabiliza el tiempo y el volumen de agua necesario para la reinicialización de los niveles de agua en las cámaras.

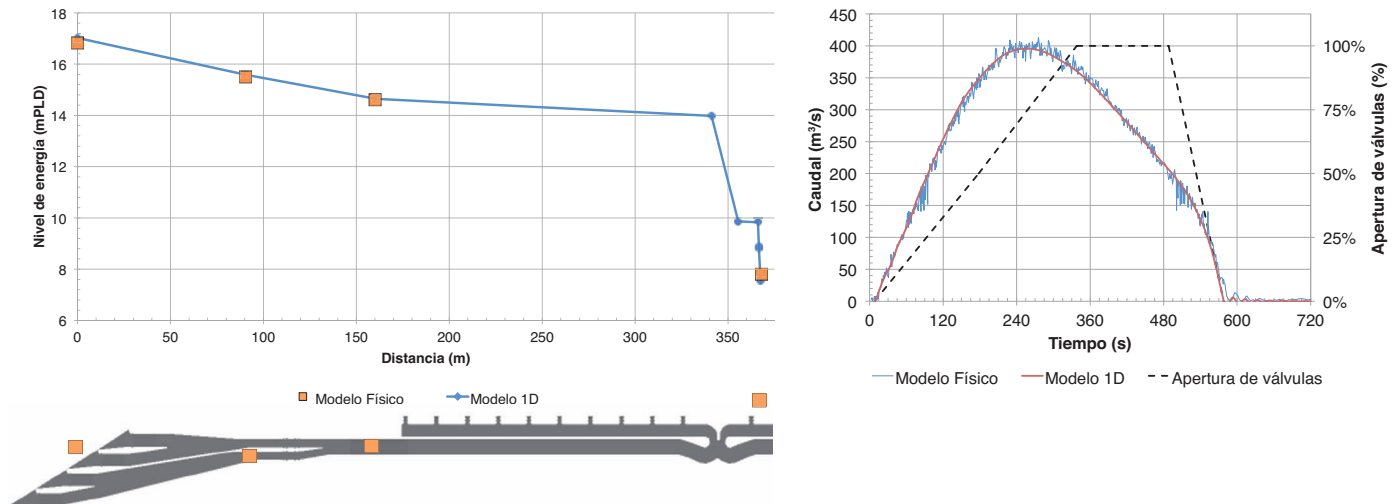


Figura 5. Validación del modelo 1D. *Izquierda:* distribución de presión en escenario estacionario para operación de llenado entre Lago y Cámara Superior (caudal = 400 m³/s). *Derecha:* hidrograma para operación de llenado entre Cámara y Cámara (diferencia inicial de nivel = 21 m).

3.3. Modelación unidimensional

La modelación unidimensional de flujo en conductos es una aproximación estándar [7]. Los modelos unidimensionales se construyeron según el software comercial Flowmaster V7 (<http://www.flowmaster.com/>). Se supuso un fluido incompresible y tuberías rígidas.

Se utilizaron los siguientes elementos disponibles en el software:

- “Reservorios” para representar las cámaras, las tinas, el lago y los océanos; para los dos primeros se especificaron relaciones nivel de agua frente a área superficial; los dos segundos se consideraron reservorios infinitos, especificándose entonces el nivel de agua.
- “Tubos rectangulares” para representar los conductos principal y secundario, y las conexiones a las tinas; las pérdidas por fricción se expresaron mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, y el factor de Darcy mediante la fórmula de Colebrook-White, que lo parametriza en términos de la rugosidad de la superficie y el número de Reynolds [7]; los flujos siempre cayeron en la categoría de régimen hidráulicamente liso.
- “Pérdidas discretas” para representar las pérdidas locales en tomas, descargas, codos, uniones y ramificaciones; como se comentó anteriormente, los correspondientes coeficientes de pérdida de carga surgieron de la bibliografía [7,8] para los componentes estándar (o los de poca influencia relativa), y de modelos tridimensionales RANS para los componentes no estándar (véase más adelante), donde se dan las pérdidas principales.
- “Sistemas de regulación” para representar la operación temporal de las válvulas.

Cada modelo unidimensional representa una interconexión entre reservorios: lago-cámara superior, cámara-cámara, cámara inferior-océano y cámara-tina. Los modelos se construyeron ensamblando los elementos entre sí, de modo que el paso espacial de discretización varió dentro del rango determinado por la mínima y la máxima longitud del conducto (4 y 193 m, respectivamente). La máxima cantidad de elementos llegó a alcanzar 550; la cantidad de ecuaciones es del orden del doble de la de elementos. Por razones de precisión, el paso temporal debe ser el mínimo paso espacial dividido entre la velocidad media de flujo (alrededor de 5 m/s); se fijó entonces en 1 segundo.

Los ensayos con los modelos unidimensionales simulan transitorios de equiparación de nivel entre los dos reservorios extremos. Se motorizan a través de la condición inicial, que impone un desnivel entre ellos. Las condiciones de borde son libres en los reservorios de tipo cámara o tina (relación nivel de agua frente al área superficial), y for-

zadas (nivel de agua) en los reservorios que representan el lago o los océanos.

Los modelos unidimensionales se validaron comparando sus predicciones con mediciones en el modelo físico para ensayos tanto en régimen permanente como dinámico, como se ilustra en la figura 5. El máximo error numérico para los niveles de energía calculados en régimen permanente fue de 0,25 m, frente a diferencias de energía medias del orden de 10 m (error relativo del 3%), mientras que el error cuadrático medio para los caudales calculados en régimen dinámico (después de filtrar las fluctuaciones turbulentas y el ruido del equipo de medición) fue de 8,3 m³/s, frente a caudales medios de 100 m³/s (error relativo del 8%). La validación significa que las pérdidas distribuidas y locales son capturadas correctamente, por lo cual engloba tanto al modelo unidimensional como a los modelos tridimensionales RANS que lo alimentaron con los coeficientes de pérdida de carga. Es muy importante remarcar que, para estas comparaciones, en la simulación numérica se utilizaron las dimensiones del modelo físico, ya que los efectos de escala en este último son significativos. Los modelos unidimensionales tienen en cuenta estos efectos de escala a través de la dependencia de la pérdida por fricción con el número de Reynolds, y de las pérdidas locales con las dimensiones [10].

3.4. Modelación bidimensional

La modelación de flujo a superficie libre de tipo bidimensional horizontal, basada en las ecuaciones para aguas poco profundas (que surgen de la integración de las ecuaciones de Navier Stokes sobre la dirección vertical, y la hipótesis de distribución hidrostática de presiones), es también una aproximación estándar [11]. Los modelos bidimensionales se construyeron sobre la base del código numérico HIDROBID II, desarrollado en el Instituto Nacional del Agua (Ezeiza, Argentina), que efectúa la resolución numérica mediante un método de diferencias finitas con malla espacial tipo Arakawa C, y discretización temporal de tipo implícita de direcciones alternadas [12]. Por razones de precisión, el paso temporal debe ser el paso espacial dividido entre la celeridad media de las ondas de gravedad (del orden de 10 m/s); se fijó entonces en 0,1 segundos.

Los ensayos con los modelos bidimensionales simulan transitorios durante los cuales se producen oscilaciones de la superficie libre en la cámara. Se motorizan a través de la especificación de las series temporales de caudal ingresado por los 20 puertos (condiciones de borde), que surgen de los modelos unidimensionales.

La validación de los modelos bidimensionales también se llevó a cabo comparando sus predicciones con mediciones en el modelo físi-

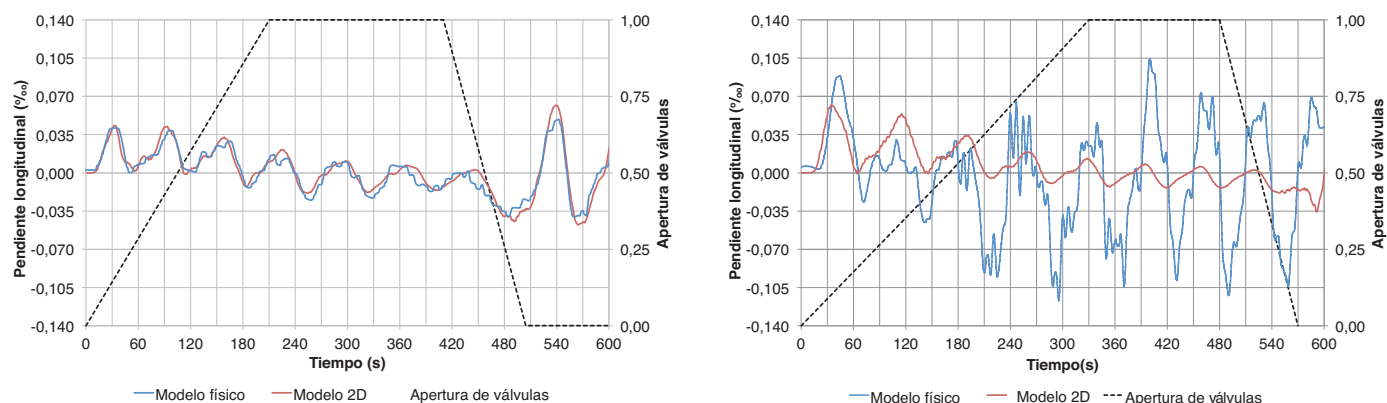


Figura 6. Comparación entre pendientes longitudinales de la superficie libre medidas y simuladas para distintas diferencias iniciales de nivel. *Izquierda:* Cámara Inferior a Océano, 9 m. *Derecha:* Cámara a Cámara, 21.0 m.

co. En este caso, los efectos de escala no son significativos. La *figura 6a* ilustra la validación para un caso de diferencia inicial de nivel relativamente baja; el error cuadrático medio para las pendientes calculadas fue de 0,006 %, frente a pendientes máximas (que es el parámetro significativo de diseño) de 0,05 %, es decir un error relativo del 10%. Por su parte, la *figura 6b* muestra el tipo de desacuerdo para un caso de diferencia alta; como se explicó anteriormente, este desacuerdo se debe a la limitación del forzante provisto por el modelo unidimensional, que entonces debe ser reemplazado por un modelo tridimensional LES (véase más adelante).

3.5. Modelación tridimensional

Los modelos tridimensionales RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes equations*) se basan en las ecuaciones de Reynolds [13], habiéndose seleccionado el modelo de turbulencia “k-ε Realizable” [14]. Por su parte, los modelos tridimensionales LES (*Large Eddy simulation*) se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes filtradas con un pasa-bajos [15], representando así el rango de mayores escalas turbulentas (a un costo computacional mucho más elevado); la longitud de corte del filtro se seleccionó según el método de Deardorff [15].

La mayoría de los problemas tratados fueron del tipo de flujo interno (o flujo en conducto a presión), aunque en algunos se debió representar la superficie libre. Las condiciones de borde en paredes se trataron por medio de funciones de pared (consideradas hidráulicamente lisas, como se verificó explícitamente), para lo cual fue necesario garantizar que el primer nodo de cálculo de la malla cayera siempre dentro la zona de perfil de velocidad logarítmico [15]. Las

superficies libres se trataron como tapa rígida, salvo en el problema de vorticidad en tinas, al que se le aplicó una variante del método de los volúmenes de fluido [16].

Los modelos se implementaron dentro del código numérico abierto OpenFOAM (*open field operation and manipulation*), CFD (*computational fluid dynamics*) Toolbox, versión 1.7 [17]. Este opera siguiendo el método de los volúmenes finitos sobre mallas poliédricas no estructuradas. La generación de mallas se llevó a cabo con el código abierto Gmsh (*generic Mesh*) (<http://geuz.org/gmsh/>), complementado con el código abierto enGrid (<http://www.ohloh.net/p/engrid>) para construir la malla adyacente a las paredes.

Se llevaron a cabo diversos ensayos de validación de la técnica de modelación RANS, comparando sus predicciones con curvas empíricas de coeficientes de pérdida de carga para distintos problemas estándar, a saber: curvas bruscas (codos), curvas suaves y válvula (este caso se ilustra en la *Fig. 7*) [7,8,18]. Además, se reprodujeron satisfactoriamente perfiles de velocidades medidos en uno de los puertos de un sistema cámara/puertos de laboratorio [19].

Para el diseño de la mayoría de los componentes no estándar se implementaron modelos tridimensionales RANS locales. En el caso de la conexión central, el diseño se efectuó acoplándola con el tramo activo del conducto principal, los conductos secundarios, los puertos y media cámara (suponiendo condiciones de simetría), dada la sensibilidad de la pérdida energética a las condiciones de entrada y salida del flujo. La cantidad de elementos de las mallas de cálculo varió entre 1 y 4 millones, aproximadamente. Los pasos de malla, fuera de la zona de capa límite, variaron entre 0,4 y 0,8 m en conductos y puertos, y entre 0,8 y 3 m en las cámaras. Se operó en régimen permanente, dado que las dimensiones son lo suficientemente cortas como para que los efectos de la impermanencia sean despreciables. El forzante del movimiento fue el caudal, especificado como condición de borde en la entrada a través de la distribución de velocidades. A la salida se fijó un valor uniforme de presión. Se efectuaron ensayos para caudales relativamente altos en ambas direcciones (casos de llenado y vaciado), considerando una densidad uniforme. La *figura 8* muestra, a título ilustrativo, una vista tridimensional de las líneas de corriente para la conexión central en modo llenado.

En el caso del problema de la vorticidad en la obra de toma de la tina, fue necesario incluir el mecanismo de tensión superficial en las ecuaciones de movimiento (particularmente significativo en el modelo físico). Además, se implementó un algoritmo de densificación automática de celdas en las cercanías de la toma cuando aumenta la vorticidad, consistente en un refinamiento dinámico mediante subdivisión de celdas en ocho subceldas cuando un indicador que incluye el valor de la componente vertical de la vorticidad y la distancia a la pared inmediata supera un cierto valor umbral [20]. La validación cualitativa de la técnica consistió en comparar los vórtices simulados con los observados en el modelo físico (*Fig. 9*).

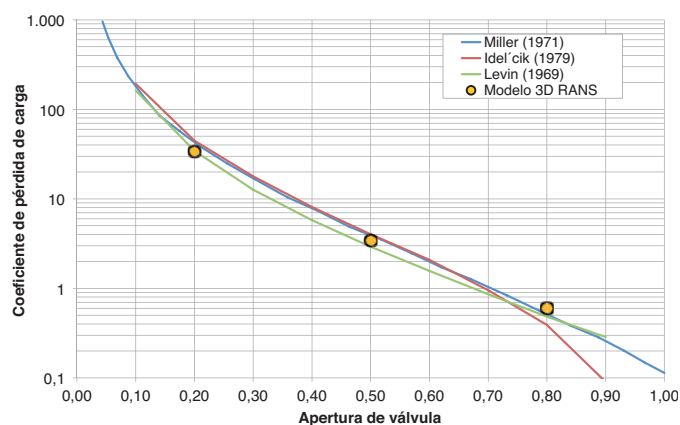


Figura 7. Comparación de coeficientes de pérdida de carga para una válvula en un conducto en función de la apertura calculados con el modelo 3D RANS y predicho por curvas empíricas.

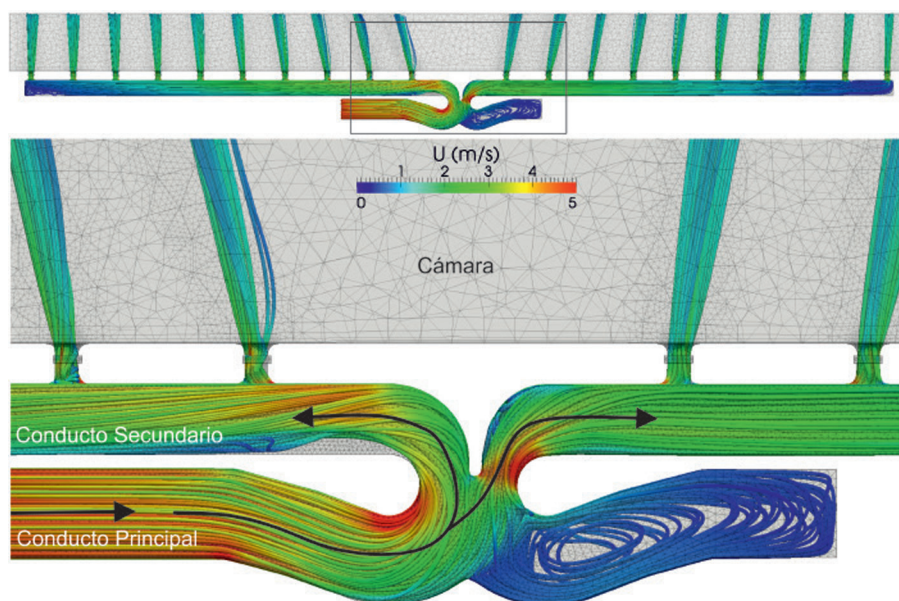


Figura 8. Líneas de corriente para la Conexión Central, en el caso de llenado (caudal = 300 m³/s).

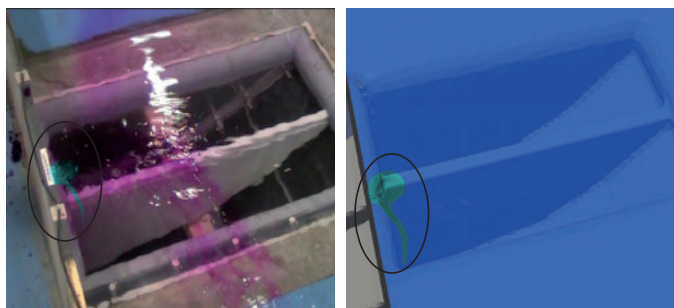


Figura 9. Comparación entre vórtices observado en modelo físico (izquierda) y simulado (derecha).

Para el problema de la conexión central se efectuaron además simulaciones tipo LES, para generar los hidrogramas en los puertos para alimentar el modelo bidimensional incluyendo las oscilaciones turbulentas, en el caso de altas diferencias de nivel inicial. Los pasos de malla se tomaron solo levemente menores a los de las simulaciones tipo RANS; fuera de la zona de capa límite, variaron entre 0,3 y 0,6 m en conductos y puertos, y entre 0,6 y 3 m en las cámaras. A las series temporales de velocidad media turbulenta en la entrada (condición de borde), que se construyeron a partir de los resultados del modelo unidimensional, se adicionaron las amplitudes de los componentes estocásticos asociados a flujo totalmente desarrollado [10]. De esta manera se logró replicar satisfactoriamente las oscilaciones registradas en la superficie libre, como se ilustra en la figura 10. Los tiempos de máquina, en una PC Core I7 corriendo en paralelo con ocho procesadores, fueron de entre 15 y 30 días. Cabe destacar que también se validó la modelación tridimensional LES comparando sus predicciones sobre distribuciones laterales de velocidad en los puertos con mediciones en el modelo físico (mediante un correntómetro de tipo molinete), tal como se muestra en la figura 11.

4. Resultados y discusión

4.1. Estrategias de selección y optimización

Los elementos críticos que determinan el desempeño del sistema de llenado/vaciado, en términos de los tiempos necesarios para comple-

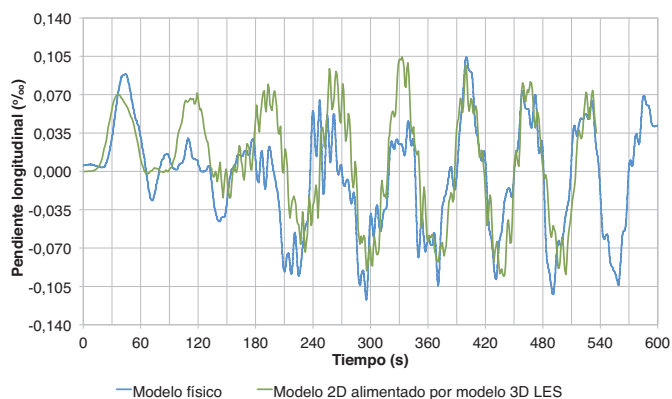


Figura 10. Comparación entre pendientes longitudinales de la superficie libre medidas y simuladas para operación Cámara a Cámara (diferencia inicial de nivel = 21.0 m) utilizando hidrogramas producidos con el modelo 3D LES.

tar las operaciones de esclusado, son los componentes no estándar, donde se producen pérdidas concentradas de energía debido a fenómenos de separación de capa límite, formación de corrientes secundarias, etc. La minimización de estas pérdidas requirió de un laborioso trabajo de selección de alternativas y optimización del diseño.

La estrategia para seleccionar el diseño consistió en modelar cada alternativa de cada componente de forma individual (como se ilustra en la Fig. 12), ensayándola para un caudal relativamente alto, y eligiendo la que indicaba el mejor compromiso entre alto desempeño hidráulico (menores pérdidas energéticas) y mayores ventajas estructurales y económicas. La alternativa seleccionada fue verificada posteriormente para diferentes caudales. Algunos componentes se acoplaron para tener en cuenta la influencia de las condiciones de aproximación (divisor de flujo + conexión al secundario; conexión al secundario + conducto secundario + puertos; tina superior + trifurcación).

La estrategia de optimización del diseño se basó en dos criterios: en primer lugar, en el ajuste de las formas para copiar las líneas de corriente, tratando de evitar o minimizar la separación del flujo, y reduciendo así el valor del coeficiente de pérdida; y en segundo lugar, en la disminución de la velocidad de aproximación introduciendo expansiones suaves aguas arriba de la componente, reduciendo así la energía cinética, que es la que multiplica el coeficiente de pérdida.

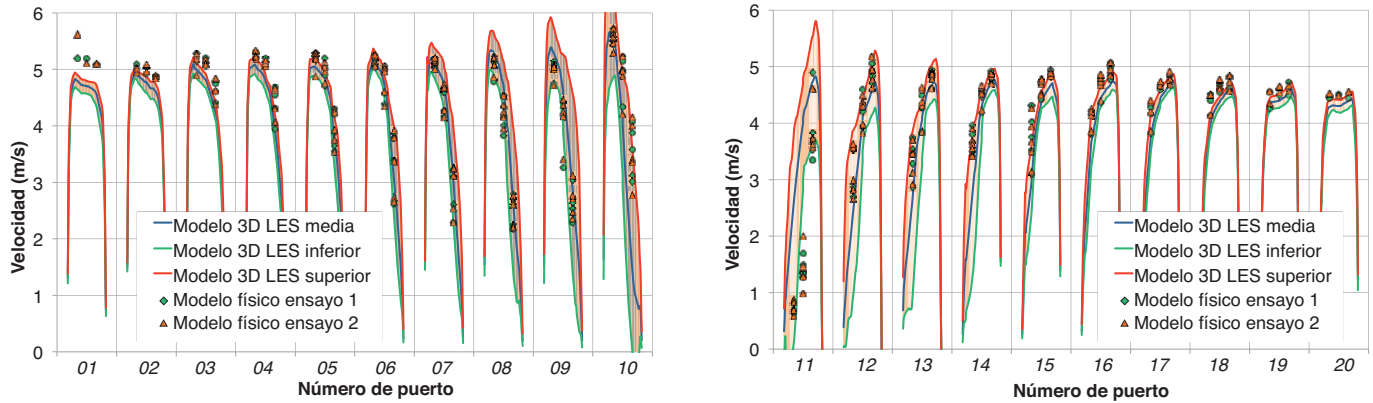


Figura 11. Comparación entre distribuciones laterales de velocidades en los 20 puertos medidas en el modelo físico (para dos ensayos idénticos, denominados 1 y 2) y calculadas con el modelo 3D LES (en tres transectas, una superior, una media y una inferior) para un caudal de 300 m³/s (dimensiones en escala de prototipo).

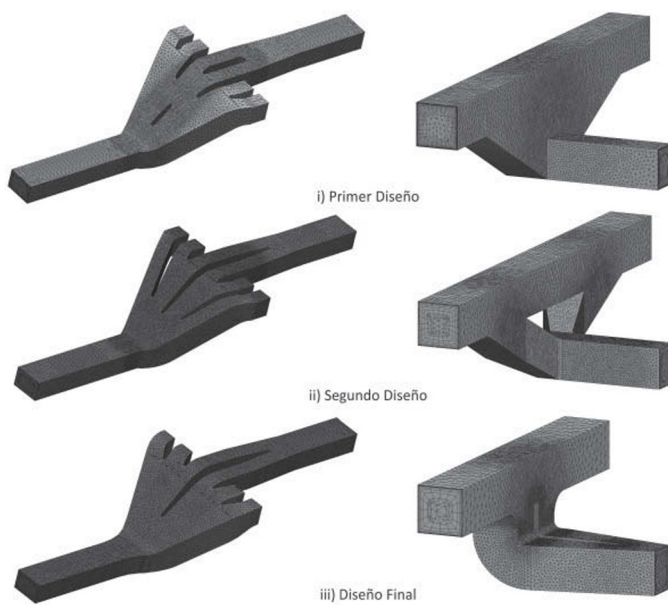


Figura 12. Vistas 3D de alternativas de dos componentes no estándar.

Una vez logrado el mejor resultado posible, se simplificó la geometría, reemplazando formas complejas por series de segmentos rectos, para

tratar de facilitar los aspectos constructivos manteniendo el desempeño hidráulico.

4.2. Tiempos de llenado y vaciado

Aplicando el modelo unidimensional a la escala del prototipo, se determinaron los tiempos de apertura de válvulas para que no excedieran la velocidad máxima de flujo, para distintas diferencias iniciales de nivel entre reservorios. A título ilustrativo, la *figura 13* muestra, para un caso particular, la velocidad máxima de flujo (verificando la restricción impuesta) y los tiempos de llenado/vaciado; se indican, asimismo, la duración de la apertura, el tiempo de inicio del cierre y la duración del cierre de las válvulas del conducto principal.

Para mostrar los efectos de escala, la *figura 14* presenta la comparación entre los tiempos de llenado/vaciado a escala de modelo físico y de prototipo calculados con el modelo unidimensional para la misma operación; se observa que los segundos son alrededor del 10% inferiores a los primeros.

4.3. Pendientes máximas de la superficie libre

Partiendo de la aplicación del modelo bidimensional a la escala del prototipo se determinaron los tiempos de cierre de válvulas para no exceder las pendientes máximas de la superficie libre en las cámaras (indicadores de las fuerzas sobre las amarras), para distintas diferencias iniciales de nivel entre reservorios. A título ilustrativo, la *figura 15* muestra la verificación de las pendientes extremas (0,14% y 0,10%

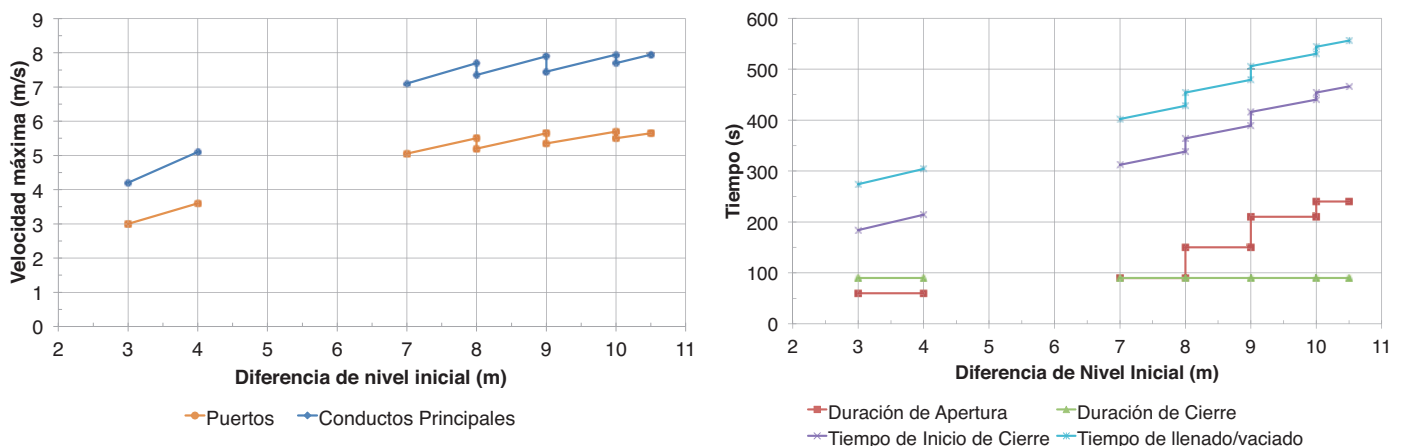


Figura 13. Operación Lago-Cámara Superior sin uso de tinajas. Parámetros en función de la diferencia inicial de niveles. *Izquierda:* velocidad máxima. *Derecha:* tiempo de llenado/vaciado.

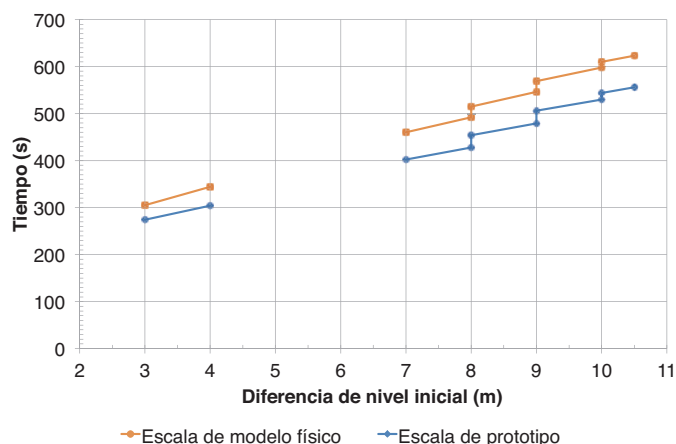


Figura 14. Tiempo de llenado/vaciado en función de la diferencia inicial de niveles para operación Lago-Cámara Superior: comparación entre escala de modelo físico y de prototipo.

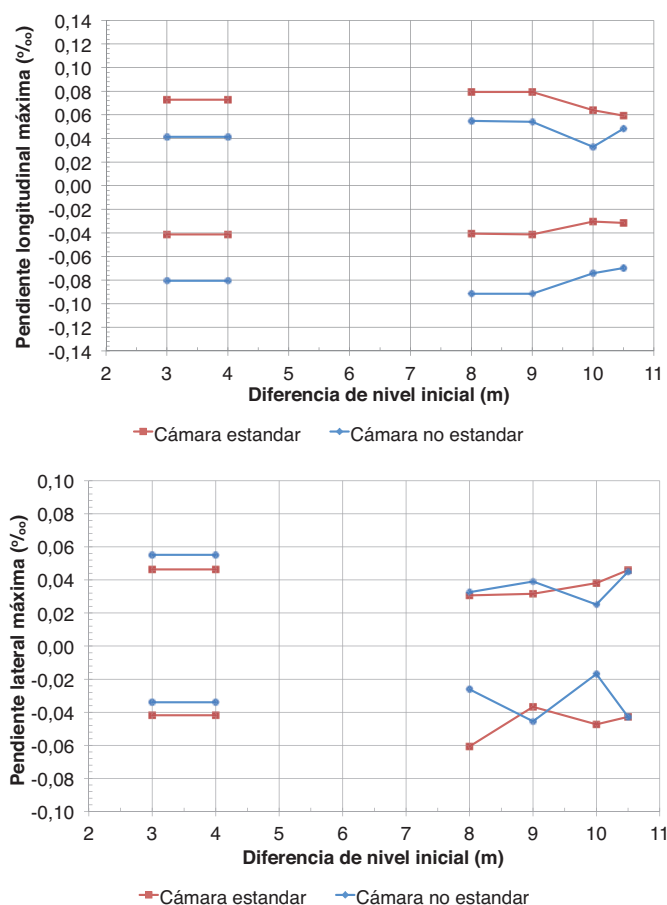


Figura 15. Pendientes extremas en función de la diferencia inicial de niveles para operación Lago-Cámara Superior. Superior: Longitudinal. Inferior: Lateral.

para longitudinal y lateral, respectivamente) calculadas para la operación lago-cámara, para condiciones estándar (operando con tinas) y no estándar (operando sin tinas).

4.4. Tasa de pasaje de buques y ahorro de agua

El modelo cerodimensional se aplicó para determinar las tasas medias de pasaje de buques y de consumo de agua dulce, y el ahorro de agua dulce por la utilización de las tinas (obviamente, a costa de un incremento de los tiempos de llenado/vaciado). Se simuló un año de

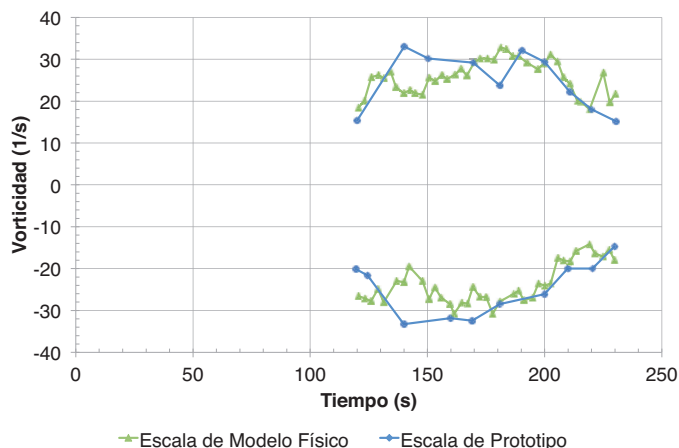


Figura 16. Evolución temporal de la vorticidad máxima para el vaciado de la Tina Baja, de acuerdo al modelo 3D RANS.

operación, subdividido en cuatro escenarios distintos (combinando los niveles de aguas altas y bajas del lago Gatún con los de rangos de marea máximo y mínimo). La *tabla 1* muestra los resultados obtenidos para ambos sistemas de esclusas. Se observa relativamente poca variación entre escenarios. La tasa media diaria de pasaje de buques es algo menor de 16, con aproximadamente 4 buques menos por el uso de las tinas. La tasa media de consumo de agua dulce (operando las tinas) es de 100.000 m³/buque, produciendo el uso de las tinas un ahorro de casi el 60%.

4.5. Vorticidad en las tomas de tinas

El estudio del problema de vorticidad exclusivamente en un modelo físico plantea la dificultad de que el tipo de vórtice esperado a escala de prototipo es de mayor intensidad que el observado en el laboratorio, debido a la imposibilidad de representar a escala la tensión superficial (número de Weber), por lo cual los resultados no son concluyentes. Entonces, en este proyecto se utilizó la modelación numérica para estimar las condiciones a escala de prototipo. En la *figura 16* se muestra, para el caso del vaciado de la tina baja, la comparación entre las evoluciones temporales de la componente vertical de la vorticidad (rotor del vector velocidad) máxima para las escalas de modelo físico y de prototipo, de acuerdo con el modelo tridimensional RANS [20]. Como era de esperar, se observa que la vorticidad máxima más intensa se alcanza en el último caso. No obstante, el aumento es relativamente leve.

Se utilizó el modelo físico para determinar la alternativa más eficiente para disminuir al máximo posible la vorticidad. Esta alternativa consistió en la incorporación de dos espigones en los laterales de la toma, con el objetivo de inducir un patrón de escurrimiento más orientado hacia ella. El modelo numérico indicó que, para esta situación, tampoco se producía un aumento significativo de vorticidad al pasar de la escala del modelo físico a la del prototipo, por lo cual la solución adoptada se consideró segura.

5. Conclusiones

El diseño del sistema hidráulico de llenado/vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá constituye un caso paradigmático en cuanto al empleo de un sistema integrado de modelación, constituido por diversos modelos numéricos y un modelo físico. La modelación numérica ha sido la base fundamental del diseño, y el mecanismo para generar resultados a la escala de prototipo libres de efectos de escala presentes en el modelo físico. El objetivo principal de la modelación física ha sido el de validar la modelación numérica.

Tabla 1.

Tasa media de pasaje de buques y consumo de agua

Sistema	Nivel lago (m PLD)	Rango marea (m PLD)	Tasa diaria pasaje buques		Tasa consumo agua con tinas (m ³ /buque)	Ahorro agua (%)
			Sin tinas	Con tinas		
Pacífico	27,13	[-3,44; 3,60]	19,45	15,51	108.293	59,0%
	27,13	[-2,32; 2,40]	19,48	15,62	107.374	59,5%
	24,72	[-3,44; 3,60]	19,83	15,64	99.447	58,6%
	24,72	[-2,32; 2,40]	19,83	15,79	98.607	59,2%
	Promedio		19,65	15,64	103.430	59,1%
Atlántico	27,13	[-0,40; 0,55]	19,55	15,67	107.185	59,5%
	27,13	[-0,12; 0,30]	19,55	15,67	107.113	59,5%
	24,72	[-0,40; 0,55]	19,87	15,84	98.229	59,3%
	24,72	[-0,12; 0,30]	19,89	15,84	98.122	59,3%
	Promedio		19,72	15,76	102.662	59,4%

Los modelos unidimensionales han sido las componentes centrales del sistema de modelación, proveyendo los tiempos de llenado/vaciado de las cámaras, y verificando el cumplimiento de la restricción sobre la velocidad máxima de flujo. Los modelos tridimensionales RANS de componentes no estándar determinaron con precisión la pérdida de energía mecánica entre la entrada y la salida, generando coeficientes de pérdida de carga local para los modelos unidimensionales. Con este tipo de modelación tridimensional RANS también se pudo evaluar la vorticidad en las obras de toma. Los modelos bidimensionales horizontales (integrados en la vertical) de las cámaras representaron adecuadamente las oscilaciones de la superficie libre, a partir de los hidrogramas en los puertos provistos por los modelos unidimensionales, permitiendo entonces verificar las pendientes longitudinales y laterales máximas (indicadores de las fuerzas máximas sobre las amarras). Para los casos de muy alta diferencia de nivel inicial entre las cámaras, en los que se detectó resonancia entre estas oscilaciones y torbellinos generados por la conexión central del sistema de llenado/vaciado, se recurrió con éxito a modelos tridimensionales LES para generar los hidrogramas en los puertos, en lugar de los modelos unidimensionales, que no tienen la capacidad de representar oscilaciones turbulentas. Los modelos cerodimensionales proveyeron las tasas medias de pasaje de buques y de volumen de agua dulce consumido, que son los principales indicadores de desempeño del sistema.

En esencia, este artículo presenta una combinación original de una serie de modelos en cascada para resolver un problema muy complejo. En particular, se ha establecido una estrategia de estudio de sistemas de esclusas que puede replicarse con confianza en futuros estudios. Las mediciones previstas en el prototipo, una vez que se ponga en marcha la obra, servirán para terminar de verificar determinadas partes de la metodología.

Agradecimientos

Este trabajo formó parte de los estudios realizados para el Consorcio GUPC (Grupo Unidos por el Canal) a través de la Consultora MWH (Montgomery-Watson-Harza). Contó con la supervisión del Ing. Nicolás Badano (MWH). El grupo de modelación numérica estuvo además constituido por Fernando Re, Martín Sabarots Gerbec y Mariano Re.

Se agradece además a los Revisores de este artículo por su atenta lectura y sugerencias, que condujeron a su enriquecimiento.

Bibliografía

- [1] PIANC. Final Report of the International Commission for the Study of Locks. Brussels; 1986; p. 460.
- [2] PIANC. "Innovations in Navigation Lock Design", Report n° 106, Ph. Rigo (Editor) – INCOM WG29 Chairman. Brussels; 2009.
- [3] Panama Canal Authority. Proposal for the Expansion of the Panama Canal. Third Set of Locks Project. 24 April 2011. Disponible en: <http://www.acp.gob.pa/eng/plan/documentos/propuesta/acp-expansion-proposal.pdf>.
- [4] Lara CM, Lim Cárdenas AL, Monroy JC. The Panama Canal Existing and New Locks: Same Goal, Different Scales. *Hydrolink*. 2014;1:6-9.
- [5] Re F, Badano ND, Menéndez AN, Sabarots Gerbec M, Lecertúa EA, Re M. Modelación numérica del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá para el estudio de alternativas de diseño. *Anales XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay; noviembre 2010.
- [6] Calvo Gobetti LE. Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 2013;1:1,28-38.
- [7] Miller DS. *Internal Flow Systems*, BHRA. The Fluid Engineering Center, Cranfield, Bedford, UK; 1971.
- [8] Idel'cik IE. *Memento des Pertes de Charge*, Eyrolles Editor, Collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, Paris, France; 1979.
- [9] Le Méhauté B. *An Introduction to Hydrodynamics & Water Waver*. Springer Verlag; 1976.
- [10] Menéndez AN, Badano ND. Interaction between Hydraulic and Numerical Models for the Design of Hydraulic Structures. En: Schulz HE, Andrade Simoes AL, Jahara Lobosco R (eds.). *Hydrodynamics: Optimizing Methods and Tools*, InTech; October 2011. Disponible en: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/interaction-between-hydraulic-and-numerical-models-for-the-design-of-hydraulic-structures>.
- [11] Abbott MB. *Computational Hydraulics, Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Longman; 1979.
- [12] Menéndez AN. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*. 1990;6: 25-36.
- [13] White FM. *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill; 1974.
- [14] Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Zhu J. A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation. *Computers Fluids*. 1995;24:227-38.
- [15] Sagaut P. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*. New York: Springer-Verlag; 2001.
- [16] Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981;39:201-25.
- [17] Weller HG, Tabor G, Jasak H, Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object orientated techniques. *Computers in Physics*. 1998;12:620-31.
- [18] Levin L. *Formulaire des conduites forces oleoducts et conduits d'aération*, Paris, France; Dunon; 1969.
- [19] Consorcio Post Panamax. Task 1.2.5. Numerical model of variations for the selected F/E System. Final Report. Septiembre 2007.
- [20] Sabarots Gerbec M, Menéndez AN, Badano ND. Cuantificación de efectos de escala de modelo físico durante el estudio de formación de vórtices en tomas de agua mediante modelación numérica. *Anales XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. San José, Costa Rica; Septiembre 2012.